

种养一体规模化农场温室气体排放量分析

石鹏飞, 郑媛媛, 杨东玉, 党静, 王贵彦^① (河北农业大学农学院, 河北保定 071001)

摘要: 为准确评估华北平原种养一体规模化农场温室气体排放量,以河北某种养一体规模化农场为例,应用生命周期评价方法,根据《IPCC 2006 国家温室气体清单指南》中的排放系数,计算该农场运行过程中温室气体排放量。结果表明,农场运行过程中年温室气体总排放量(以 CO₂ 当量计,下同)为 32 528.02 t,其中农田生产系统排放占 28.09%,养殖场排放占 71.91%,其中粪便贮存管理、饲料生产和加工、肠道发酵及氮素生产和施用等生产环节是温室气体主要排放源,分别占总排放量的 34.66%、21.24%、15.48%和 20.08%。生产 1 t 小麦、玉米籽粒的温室气体排放量分别为 1 059.39 和 411.92 kg;生产 1 kg 原奶和 1 kg 按蛋白质和脂肪纠正的牛奶(FPCM)的温室气体排放量分别为 1.04 和 1.14 kg,低于全球平均水平;生产 1 kg 活体猪、肉牛的温室气体排放量分别为 2.58 和 10.00 kg,与国内其他集约化养殖场的排放量相当。通过情景分析发现,种植生产中采取减氮(化肥)以及提高畜禽粪便废弃物处理能力等措施,加强农场氮素管理,改善饲料结构,可直接或间接减少农场水平温室气体排放。

关键词: 种养一体规模化; 农场水平; 温室气体; 减排潜力

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2017)03-0207-08

DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2017.03.003

Estimation of Greenhouse Gas Emissions in Scaled Crop-Livestock Integrated Farms in North China Plain. SHI Peng-fei, ZHENG Yuan-yuan, YANG Dong-yu, DANG Jing, WANG Gui-yan (College of Agronomy, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

Abstract: The North China Plain is one of the most important crop and livestock production regions, and large-scaled crop and livestock integrated farms are common and typical of the region and thought to be an effective way to solve the environment pollution. Emission of greenhouse gases from the crop and livestock system is already accepted as a main cause of climate change. The objective of this study is to quantify greenhouse gas (GHG) emission from a farm of such a nature in the North China Plain. The life-cycle-based assessment method was used to estimate GHG emission during the operation of the farm by referring to the calculation methodology and emission coefficients specified in the "IPCC 2006 National Guide for and List of GHG". Results show that the annual total GHG emission from the farm was 32 528.02 t (CO₂-equivalence, the same below), among which the farming system contributed 28.09%, and the livestock system did 71.91%. During the operation of the farm, the processes of livestock waste handling and storage, animal feed production and processing, intestinal fermentation and nitrogen production and application were the main sources of GHG emission, contributing 34.66%, 21.24%, 15.48% and 20.08% to the total, respectively. The production of 1 kg of wheat and maize grains emitted 1 059.39 and 411.92 kg, respectively; the production of 1 kg of raw milk and 1 kg of fat-protein corrected milk (FPCM) did 1.04 and 1.14 kg, respectively, which was lower than the average of the world; and production of 1 kg of live pig and beef cattle did 2.58 and 10.00 kg, respectively, similar to those from other intensive animal farms in the country. Scenario analysis shows that to reduce N (fertilizer) application rate, improve the capacity of handling and treating livestock waste, intensify N management and modify feed composition may directly or indirectly mitigate GHG emissions from such farms.

Key words: mixed farm; farm level; greenhouse gas; emission reduction potential

气候变暖是当今国际社会普遍关注的全球性环境问题,也是人类面临的最严峻的挑战之一,而温室气体(GHG)的增加是造成气候变暖的重要原因。其中涉及农业源的温室气体有二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)^[1]。联合国粮食及农业组织(FAO)指出,种植业和畜牧业温室

气体排放分别占全球人为温室气体排放的 30%和 18%^[2]。根据联合国政府间气候变化专门委员会

收稿日期: 2016-04-18

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAD14B07-06-02)

① 通信作者 E-mail: guiyang@sina.com

(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第五次评估报告,全球范围内农业排放 CH_4 和 N_2O 分别占人类活动造成的 CH_4 和 N_2O 排放总量的 50% 和 60%^[3]。中国农业源温室气体排放占全国温室气体排放总量的 17%,其中农业活动排放的 CH_4 和 N_2O 分别占全国 CH_4 和 N_2O 排放量的 50.15% 和 92.47%^[1]。

华北平原是我国重要的粮食生产基地,耕地面积占全国耕地总面积的 26.57%^[4],粮食产量占全国粮食总产量的 34.39%,氮肥用量占全国用量的 35.02%^[5]。冬小麦-夏玉米一年两熟制是华北平原最主要的种植制度,该区农田管理的主要特点是施用化肥和秸秆全量还田,这就必然伴随着 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等温室气体的产生和排放。目前,推广减少氮肥施用、无机和有机肥相结合、测土配方施肥和秸秆还田综合管理等措施是农田温室气体减排的潜力所在^[1,6-9]。华北平原农区畜牧业也发展迅速,过去的农户分散养殖已逐渐被规模化、集约化的养殖场取代,大量畜禽粪便等废弃物在堆置过程中产生的温室气体造成了严重的面源污染。因此,种植和养殖相结合是解决畜禽废弃物面源污染的重要途径^[10-11],而改善饲料质量、提高动物生产力、改进粪便贮存管理模式以及建设沼气工程等都是集约化养殖场温室气体减排的重要措施^[12-17]。

河北某种养一体规模化农场采用华北平原典型的农牧结合模式,通过秸秆回收青贮作饲料、畜禽粪便进入沼气池发酵和替代部分化肥还田、沼液和沼渣还田等接口技术链接种植和养殖生产环节,不仅提高了物质循环效率,而且有利于温室气体减排。但截至目前,有关温室气体排放的研究大都仅涉及农田生产系统和畜牧养殖系统的某个环节或某个子系统,而针对种养一体规模化农场温室气体排放评估的研究相对较少。

生命周期评价(LCA)是对一个产品系统的生命周期中输入、输出及潜在环境影响的汇编和评价^[18],它提供了一种从系统角度分析问题的思路和评估的标准方法^[19]。近年来,不少国内外学者使用 LCA 对农田和畜牧生产系统的温室气体排放进行了评估^[15,20-26]。因此,笔者以河北某种养一体规模化农场为例,利用 LCA 评估方法系统分析种养一体规模化农场温室气体排放及各生产子系统排放比例,系统分析减排潜力,为提出有效减排措施提供科学依据,研究结果对华北平原农业生产过程温室气体减排具有参考意义。

1 材料与方法

1.1 农场生产概况及数据来源

河北某种养一体规模化农场是集种植、养殖、沼气发酵、饲料加工和有机肥加工等多项产业于一体的国家级循环农业园区,是华北平原典型的循环农业模式。以农场 2014 年的生产情况为例,分析其温室气体排放特点。小麦-玉米一年两熟是其主要种植制度,种植面积 $1\ 000\ \text{hm}^2$,小麦单产 $6\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,玉米单产 $6\ 750\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。小麦和玉米两季施氮量为 $557.88\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中化肥氮 $231.26\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。农田生产系统中能源消耗主要为旋耕、播种和收获等耗柴油 $188.25\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,作物生长期间灌溉耗电 $1\ 800\ \text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

养殖中奶牛存栏量为 1 400 头,其中犍牛(平均体重 $180\ \text{kg}$)420 头,育成牛(平均体重 $450\ \text{kg}$)700 头,泌乳牛(平均体重 $600\ \text{kg}$)280 头,年产奶 1 460 t;肉牛存栏量为 3 000 头,犍牛(平均体重 $180\ \text{kg}$)1 000 头,育肥牛(平均体重 $550\ \text{kg}$)1 400 头,架子牛(平均体重 $250\ \text{kg}$)600 头;猪场中母猪(平均体重 $210\ \text{kg}$)存栏量为 2 400 头,年出栏生猪(平均体重 $100\ \text{kg}$)60 000 头。出栏猪育肥过程中主要经过仔猪(平均体重 $12\ \text{kg}$,70 d)、生长猪(平均体重 $45\ \text{kg}$,30 d)和育肥猪(平均体重 $90\ \text{kg}$,90 d)3 个生长阶段。公司现已投入使用的沼气池达 $8\ 000\ \text{m}^3$,还有 $3\ 000\ \text{m}^3$ 沼气池待使用,养殖场年产粪尿 204 035 t,其中 65% 直接进入沼气池,35% 通过开放厌氧塘粪便处理系统贮存。沼气发酵所产沼气用于发电,2014 年产气量 $182.5\ \text{万}\ \text{m}^3$,年发电量 $315.36\ \text{万}\ \text{kW} \cdot \text{h}$,主要供养殖场和饲料加工及农场日常使用。

农场中的饲料主要包括青贮玉米、牧草等粗饲料和玉米、麦麸和豆粕等精饲料。养殖年消耗青贮玉米 $8\ 000\ \text{t}$ 、玉米籽粒 $13\ 294\ \text{t}$ 、麦麸 $6\ 787\ \text{t}$ 和豆粕 $5\ 781\ \text{t}$ 。其中麦麸和豆粕全部从农场外购买,玉米籽粒除农场生产的 $6\ 750\ \text{t}$ 外,其余的外购。外购玉米籽粒、麦麸和豆粕的产量和施氮量根据河北省实际生产情况取值^[27]:玉米产量为 $6.30\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,施氮量为 $0.21\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$;小麦产量为 $6.00\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,施氮量为 $0.225\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,小麦加工后出麸率为 25%,加工小麦耗电 $0.048\ \text{MW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1}$;大豆产量为 $2.032\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,施氮量为 $0.105\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,豆粕为大豆榨油后的副产品,豆粕率为 80%,加工大豆耗电 $0.03\ \text{MW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1}$ ^[17]。

1.2 系统边界的确定

根据农场种植和养殖生产过程中相关的温室

气体排放活动确定系统边界。农田生产过程主要为氮肥(化肥和粪肥)施用、化肥氮生产、灌溉耗电以及田间管理等机械能耗所排放的温室气体。养殖场排放源主要包括动物肠道发酵、饲料生产和加工、粪便贮存及养殖场日常管理运输等能耗所产生的温室气体。另外,根据碳平衡原理^[28],粪便进入沼气池发酵过程产生的温室气体为0。

1.3 温室气体排放量计算公式

化肥氮和粪肥田间施用过程中 N₂O 排放、动物胃肠道发酵产生的 CH₄ 排放和饲料生产加工过程中的温室气体排放计算公式参照文献[17];粪便贮存过程中 N₂O 排放和粪便贮存过程中 CH₄ 排放的计算公式参照文献[14]。

1.4 参数选择与说明

CO₂、CH₄ 和 N₂O 的增温潜势值根据文献[29]分别取 1、25、298。CO₂、CH₄ 和 N₂O 的计算结果皆

根据各自的当量因子以 CO₂ 当量表示。

小麦和大豆的种植过程和加工能耗带来的温室气体排放根据分配系数分配给麦麸和小麦粉、豆粕和豆油。分配系数参照文献[17]进行计算。

$$W_i = \frac{R_i P_i}{R_i P_i + (1 - R_i) P_{ci}} \quad (1)$$

式(1)中, W_i 为饲料组分 i 的排放量分配系数; R_i 为谷物 i 加工的副产品产出率(小麦的出麸率或大豆的出豆粕率),%; P_i 为谷物 i 的副产品(麦麸或豆粕)价格,元·kg⁻¹; P_{ci} 为谷物 i 主产品(小麦面粉或豆油)价格,元·kg⁻¹。根据 2014 年河北省小麦和大豆生产情况,小麦面粉价格为 3.05 元·kg⁻¹,麦麸价格为 1.36 元·kg⁻¹,大豆豆油价格为 6.75 元·kg⁻¹,豆粕价格为 3.4 元·kg⁻¹,根据公式可计算出麦麸和豆粕的分配系数分别为 0.13 和 0.67。

温室气体排放因子参数见表 1^[14,29-34]。

表 1 温室气体排放因子参数

Table 1 Parameters of factors affecting GHG emission in calculations

参数	含义描述	单位	排放源	取值	文献来源
e_{NDM}	粪肥田间施用的 N ₂ O 直接排放系数	t·t ⁻¹	土壤排放	0.010 5	[30]
e_{ND}	氮肥田间施用的 N ₂ O 直接排放系数	t·t ⁻¹	土壤排放	0.010 5	[30]
F_{GAS}	氮肥以 NH ₃ -N 和 NO _x -N 形式挥发系数	t·t ⁻¹	氮挥发	0.1	[29]
F_{GASM}	粪肥以 NH ₃ -N 和 NO _x -N 形式挥发系数	t·t ⁻¹	氮挥发	0.2	[29]
e_{NH}	大气氮沉降 N ₂ O 排放系数	t·t ⁻¹	氮沉降	0.01	[29]
F_{LM}	粪肥的渗漏损失系数	t·t ⁻¹	渗漏损失	0.25	[31]
F_{L}	氮肥的渗漏损失系数	t·t ⁻¹	渗漏损失	0.25	[31]
e_{NL}	渗漏或径流氮损失的 N ₂ O 排放系数	t·t ⁻¹	氮淋洗	0.007 5	[29]
e_{MAJ1}	奶牛胃肠道发酵 CH ₄ 排放系数	kg·头 ⁻¹ ·a ⁻¹	胃肠道	109	[29]
e_{MAJ2}	肉牛、犊牛肠道发酵 CH ₄ 排放系数	kg·头 ⁻¹ ·a ⁻¹	胃肠道	57	[29]
e_{MAJ3}	育肥猪(平均体重 100 kg)肠道发酵 CH ₄ 排放系数	kg·头 ⁻¹ ·a ⁻¹	胃肠道	1	[29]
N_{rate1}	每 1 000 kg 奶牛体重氮排泄率	kg·d ⁻¹		0.47	[29]
N_{rate2}	每 1 000 kg 肉牛体重氮排泄率	kg·d ⁻¹		0.34	[29]
N_{rate3}	每 1 000 kg 生猪体重氮排泄率	kg·d ⁻¹		0.5	[29]
E_{F2}	舍内粪污贮存 N ₂ O 排放	kg·kg ⁻¹	舍内	0.002	[29]
B_{OLT1}	每头奶牛(350 kg)粪污的最大 CH ₄ 产生潜力	m ³ ·kg ⁻¹	蓄粪池	0.13	[29]
B_{OLT2}	每头肉牛(319 kg)粪污的最大 CH ₄ 产生潜力	m ³ ·kg ⁻¹	蓄粪池	0.1	[29]
B_{OLT3}	每头生猪(28 kg)粪污的最大 CH ₄ 产生潜力	m ³ ·kg ⁻¹	蓄粪池	0.29	[29]
D_{CH_4}	CH ₄ 密度	t·m ⁻³	蓄粪池	0.000 67	[32]
M_{CFj}	开放厌氧塘的 CH ₄ 转换因子		蓄粪池	70%	[29]
$V_{\text{Sdefault1}}$	每头奶牛日排泄的挥发性固体干物质(默认值)	kg·d ⁻¹	蓄粪池	2.8	[29]
$V_{\text{Sdefault2}}$	每头肉牛日排泄的挥发性固体干物质(默认值)	kg·d ⁻¹	蓄粪池	2.3	[29]
$V_{\text{Sdefault3}}$	每头生猪日排泄的挥发性固体干物质(默认值)	kg·d ⁻¹	蓄粪池	0.3	[29]
U_{Fb}	不确定性的修正因子			0.94	[14]
M_{S}	进入系统内的粪污比例			35%	实地调查
e_{NC}	氮肥生产的 CO ₂ 排放系数	t·t ⁻¹		4.77	[33]
E_{Fa}	电网排放因子	t·MW ⁻¹ ·h ⁻¹	华北电网	0.893 6	[34]
E_{Fdiesel}	柴油燃烧的排放因子	t·t ⁻¹		3.16	[29]
$E_{\text{FKm,CO}_2}$	道路运输	kg·km ⁻¹		1.01	[29]

温室气体排放系数根据河北省饲料作物生产和农场的具体情况,结合国内研究成果和文献[29]

选择。养殖场中温室气体排放基于猪、肉牛和奶牛 2014 年存栏量进行计算,但由于存栏猪、牛群结构

和体重有所不同,因此在计算动物胃肠道发酵 CH_4 排放、粪便贮存过程中 N_2O 和 CH_4 排放时,均按照不同类型猪、肉牛、奶牛各阶段平均体重及维持时间,对照表 1 进行排放因子折算,进而计算温室气体排放总量。

2 结果与分析

2.1 农场农田生产和养殖子系统各环节温室气体排放量及所占比例

农场生产活动中,农田生产系统排放的温室气体(以 CO_2 当量计,下同)为 $9\,136.83\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,占农场年总排放量的 28.09%(表 2)。其中,农田系统的化肥氮、粪肥施用以及化肥氮生产过程中的温室气体排放所占比例较高,分别占农田生产总排放量和农场年总排放量的 71.46%和 20.08%;其次为机械和灌溉能耗,占农田生产总排放量的 28.54%。由此可知,农田系统中温室气体排放主要来自氮肥和粪肥施用及生产氮肥所产生的温室气体,其中化肥氮生产和田间施用环节温室气体排放量为 $4\,330.80\text{ t}$,占农田生产总排放量的 47.40%,为主要排放源。

表 2 农田生产系统温室气体排放量及占农场总排放量的比例

Table 2 GHG emission from the farming system and its contribution to the total from the farm

排放源	排放量/ ($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)	占农场总排放量 的比例/%
化肥氮生产	1 872.32	5.76
化肥氮施用	2 458.48	7.56
粪肥施用	2 198.68	6.76
机械能耗	998.87	3.07
灌溉能耗	1 608.48	4.94
合计	9 136.83	28.09

农场养殖系统主要包括生猪、肉牛和奶牛养殖以及饲料生产加工等生产活动,温室气体主要来源于动物肠道发酵、饲料生产加工、粪便贮存及日常管理生产过程。由表 3 可知,养殖系统温室气体年排放总量为 $23\,391.19\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,占农场年排放总量的 71.91%。其中,贡献最大的是粪便贮存过程排放,为 $11\,275.26\text{ t}$,占农场总排放量的 34.66%。由于养殖规模较大,而且现有沼气池容积不能容纳全部粪便进行沼气发酵,使得大量粪便集中贮存,从而导致温室气体排放增多;农场生猪和肉牛饲养量较大,对精饲料需求较多,因此饲料生产和加工过程中的温室气体排放也占农场总排放量的 21.24%。由于外购了大量的玉米籽粒和麦麸、豆粕

等精饲料原料,外购饲料生产过程中的化肥氮施用也排放了大量的温室气体。此外,动物肠道发酵的温室气体年排放量占年总排放量的 15.48%。

表 3 养殖生产系统温室气体排放量及占农场总排放量的比例

Table 3 GHG emission from the livestock rearing system and its contribution to the total of the farm

排放源	生产环节	排放量/ ($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)	占农场总排放量 的比例/%
肠道发酵	生猪养殖	551.30	15.48
	奶牛养殖	2 779.00	
	肉牛养殖	1 705.00	
	合计	5 035.30	
饲料生产与加工 ¹⁾	生猪养殖	4 935.52	21.24
	奶牛养殖	667.24	
	肉牛养殖	1 305.59	
	合计	6 908.35	
粪便 N_2O 排放	生猪养殖	131.92	0.64
	奶牛养殖	31.41	
	肉牛养殖	44.75	
	合计	208.08	
粪便 CH_4 排放	生猪养殖	9 845.44	34.02
	奶牛养殖	836.31	
	肉牛养殖	385.43	
	合计	11 067.18	
柴油 CO_2 排放 ²⁾	生猪养殖	33.27	0.53
	奶牛养殖	80.42	
	肉牛养殖	58.59	
	合计	172.28	
总计		23 391.19	71.91

1)包括外购麦麸和豆粕在生产及初加工时的用电排放量及农场进行精、粗饲料加工时的用电排放量;2)指养殖场日常管理机械能耗排放量。

2.2 农场内产品单位产量 GHG 排放量

农田和养殖过程中生产单位产品所排放的温室气体见表 4。由表 4 可知,生产 1 t 小麦籽粒的温室气体排放量为 $1\,059.39\text{ kg}$,生产 1 t 玉米籽粒的温室气体排放量为 411.92 kg 。养殖生产中,生产 1 kg 单位活体生猪的温室气体排放量为 2.58 kg ,低于 BASSET-MENS 等^[35] (3.5 kg)和 BLONK 等^[36] (3.7 kg)的研究结果,与周军^[37]的研究结果(大规模养殖户生命周期内单位活体猪 CO_2 排放当量为 2.978 kg)基本一致;奶牛养殖中生产 1 kg 原奶的温室气体排放量为 1.04 kg ,和新西兰、瑞典及德国的原奶生产温室气体排放范围 ($0.93\sim 1.3\text{ kg}$)一致^[38],与国内其他规模化奶牛养殖场单位产品原奶生产排放 1.398 kg 温室气体^[17]的研究结果相当。如果参照文献[17]折算成按蛋白质和脂肪含量纠

正的牛奶(FPCM)产量,生产1 kg FPCM的温室气体排放量为1.14 kg,低于国内规模化奶牛养殖场生产1 kg FPCM温室气体排放量(1.71 kg)^[39],也低于集约化养殖的全球平均水平(生产1 kg FPCM排放2.8 kg温室气体)^[40]。按奶牛养殖场年总排放量折算,每头存栏奶牛平均年排放温室气体3.1 t,低于某些规模化奶牛场的平均排放量(4.9 t)^[14]。养殖生产1 kg单位活体肉牛的温室气体排放量为10.00 kg,与国内规模化肉牛养殖育肥期间的温室气体排放强度(10.16 kg)研究结果一致^[15]。

表4 农场各系统单位产量温室气体排放量

Table 4 GHG emissions per unit output relative to system in the farm

系统	功能单位	排放量/kg
作物种植系统	1 t 小麦籽粒	1 059.39
	1 t 玉米籽粒	411.92
猪生产系统	1 kg 活体重	2.58
奶牛生产系统	1 kg 原奶	1.04
	1 kg FPCM	1.14
肉牛生产系统	1 kg 活体重	10.00

FPCM为按蛋白质和脂肪含量纠正的牛奶。

3 讨论

3.1 农场农田生产系统减氮(化肥)对温室气体减排的影响

目前农场的种植结构中,小麦-玉米两熟的农田面积占总种植面积的94.34%,生产过程基本机械化。种植过程中除小麦播种前施入282.10 kg·hm⁻²粪肥氮作为底肥外,还施用231.26 kg·hm⁻²化肥氮作为底肥和追肥,再加上玉米播种时施用的161.26 kg·hm⁻²化肥氮,小麦、玉米两季仅化肥氮施用量就达392.52 kg·hm⁻²,造成了大量N₂O排放,导致农田成为N₂O的主要排放源。根据河北平原高产小麦、玉米栽培研究,在产量达到18 845.25 kg·hm⁻²的情况下,施氮量为420~480 kg·hm⁻²^[41]。因此,减氮尤其是减少化肥氮的施用,一方面可减少因化肥氮田间施用所排放的温室气体,而且也可减少化肥氮生产过程中的温室气体排放,是目前农场温室气体减排的关键措施之一^[6-9,39]。随着粪肥施用年限的增长,不仅可以改善土壤物理结构,改良土壤肥力特性,增加土壤养分,而且能够显著提高水分利用效率^[42],农场可逐渐减少并停止施用化肥氮。根据情景分析,当小麦、玉米种植中的化肥氮施用量减少125.51 kg·hm⁻²时,在不影响

作物产量情况下,温室气体可以年减排1 384.79 t,占农田生产系统总排放量的15.6%。

养殖生产中,每年需要从农场外购买6 544.47 t玉米籽粒、6 787 t麦麸和5 781 t豆粕,外购玉米、麦麸和豆粕主要来自农户种植,而绝大部分农户基本不施用有机肥,外购玉米、麦麸和豆粕的生产消耗1 609.53 t化肥氮,间接增加农场温室气体排放。因此,可采取相关措施减少外购精饲料,间接减少化肥氮施用,这也是农场温室气体减排的潜力所在。

3.2 改善粪便综合管理方式对农场温室气体减排的影响

随着农场养殖规模的不断扩大,动物粪便堆积贮存时,在厌氧条件下会产生大量CH₄和N₂O等温室气体,对环境构成极大威胁。当有限的耕地不能全部容纳养殖废弃物时,有必要综合利用多种废弃物处理和资源化利用方式来达到更好的经济和环境效益^[43]。在可供选择的动物粪便污染控制技术中,沼气发酵可减少温室气体排放^[16,28,44-47]。

农场通过建设沼气池对畜禽粪便进行综合利用,除已投入使用的8 000 m³沼气池外,还将投入建造一套3 000 m³的沼气发酵设施,当农场沼气发酵池达到11 000 m³时,年处理粪便量可增加11%,与不使用沼气发酵相比可多减排15.68%。另外,目前农场沼气发电替代国家电网电力可间接减排温室气体2 818.06 t·a⁻¹。根据调查,农场建造沼气池虽然可以得到政府的相应补贴,但仍需要投入大量资金进行维护,而处理废弃物的经济利润较低^[43]。因此,相关部门应根据当地的排放标准和环保要求等给予一定的经济补贴和奖励。另外,对不能进入沼气池发酵的粪便,在贮存过程中可添加小麦秸秆生物质炭和过磷酸钙等物质,已有研究表明这些措施均可显著降低堆肥过程中的温室气体排放^[48-49]。

3.3 改善饲料结构对农场温室气体减排的影响

目前,农场养殖的奶牛和肉牛粗饲料以青贮玉米秸秆为主,只添加少量的高丹草和苜蓿等优质牧草。根据WANG等^[39]的研究,对奶牛养殖而言,温室气体排放量和牛奶产量与饲料中的精饲料、青贮饲料及苜蓿等成分密切相关,改善饲料构成可减少生产单位质量蛋白质的温室气体排放。研究表明,当采用3 kg苜蓿替代1.5 kg精饲料时,牛奶产量将提高11%,如果苜蓿生产中不施用化肥,总温室气体排放量将增加2%,但生产1 kg FPCM的温室气体排放将减少8%;而当替代的苜蓿生产施用化肥情况下,总温室气体排放量将增加5%,但生产1 kg

FPCM的温室气体排放将减少5%^[39]。因此,在奶牛养殖时增加苜蓿和高丹草等优质牧草,虽然总温室气体排放量有所增加,但可降低单位产品的温室气体排放。

4 结论

种养一体规模化农场在正常运行状态下的温室气体年总排放量为32 528.02 t,其中农田生产系统排放占28.09%,养殖场排放占71.91%。粪便贮存管理、饲料生产和加工、肠道发酵、氮素生产和施用等生产环节是农场温室气体的主要排放源,分别占总排放量的34.66%、21.24%、15.48%和20.08%。生产1 t小麦和玉米籽粒的温室气体排放量分别为1 059.39和411.92 kg;生产1 kg牛奶(原奶)和FPCM的温室气体排放量分别为1.04和1.14 kg,低于全球平均水平;生产1 kg活体猪和肉牛的温室气体排放量分别为2.58和10.00 kg,与国内其他集约化养殖场的排放量相当。

农场中,化肥氮生产和施用、外购大量的玉米等精饲料原料及粪便贮存过程排放了大量的温室气体,是减排的潜力所在。通过情景分析,在减少化肥氮施用、增加进入沼气发酵池粪便等情形下,可直接或间接减少大量的温室气体排放,减排潜力巨大。另外,加强粪便贮存管理和改善饲料结构,也是直接或间接减排的重要措施。

参考文献:

- [1] 董红敏,李玉娥,陶秀萍,等.中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J].农业工程学报,2008,24(10):269-273.[DONG Hong-min,LI Yu-e,TAO Xiu-ping,*et al.*China Greenhouse Gas Emissions From Agricultural Activities and Its Mitigation Strategy[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(10):269-273.]
- [2] STEINFELD H,GERBER P,WASSENAAR T,*et al.*Livestock's Long Shadow[M].Rome,Italy:FAO,2006:97-110.
- [3] EDENHOFER O,PICHS-MADUGA R,SOKONA Y,*et al.*Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press,2014:1435.
- [4] 屈宝香,周旭英,张华,等.黄淮海地区种植业结构调整与水资源关系研究[J].中国农业资源与区划,2003,24(5):29-32.[QU Bao-xiang,ZHOU Xu-ying,ZHANG Hua,*et al.*Studies of the Relation Between Structural Adjustment of Plant Industry and Water Resources in Huang-Huai-Hai Region[J].Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning,2003,24(5):29-32.]
- [5] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2015.[National Bureau of Statistics.China Statistical Yearbook[M].Beijing:China Statistics Press,2015.]
- [6] 梁龙,陈源泉,高旺盛,等.华北平原冬小麦-夏玉米种植系统生命周期环境影响评价[J].农业环境科学学报,2009,28(8):1773-1776.[LIANG Long,CHEN Yuan-quan,GAO Wang-sheng,*et al.*Life Cycle Environmental Impact Assessment in Winter Wheat-Summer Maize System in North China Plain[J].Journal of Agro-Environment Science,2009,28(8):1773-1776.]
- [7] 梁龙,王大鹏,吴文良,等.基于低碳农业的清洁生产与生态补偿:以山东桓台为例[J].中国农业资源与区划,2011,32(6):98-102.[LIANG Long,WANG Da-peng,WU Wen-liang,*et al.*Cleaner Production and Ecological Compensation Based on Low-Carbon Agriculture[J].Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2011,32(6):98-102.]
- [8] 王玉英,胡春胜.施氮水平对太行山前平原冬小麦-夏玉米轮作体系土壤温室气体通量的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(5):1122-1128.[WANG Yu-ying,HU Chun-sheng.Soil Greenhouse Gas Emission in Winter Wheat/ Summer Maize Rotation Ecosystem as Affected by Nitrogen Fertilization in the Piedmont Plain of Mount Taihang, China[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture,2011,19(5):1122-1128.]
- [9] 史磊刚,陈阜,孔凡磊,等.华北平原冬小麦-夏玉米种植模式碳足迹研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(9):93-98.[SHI Lei-gang,CHEN Fu,KONG Fan-lei,*et al.*The Carbon Footprint of Winter Wheat-Summer Maize Cropping Pattern on North China Plain [J].Chian Population, Resources and Environment,2011,21(9):93-98.]
- [10] SALEEM M A M.Nutrient Balance Patterns in African Livestock Systems[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,1998,71(1/2/3):241-254.
- [11] TORKAMANI J.Using a Whole-Farm Modeling Approach to Assess Prospective Technologies Under Uncertainty[J].Agricultural Systems,2005,85(2):138-154.
- [12] 张颖,夏训峰,李中和,等.规模化养牛场粪便处理生命周期评价[J].农业环境科学学报,2010,29(7):1423-1427.[ZHANG Ying,XIA Xun-feng,LI Zhong-he,*et al.*Life Cycle Assessment of Manure Treatment in Scaled Cattle Farms[J].Journal of Agro-Environment Science,2010,29(7):1423-1427.]
- [13] 陈瑞蕊,王一明,胡君利,等.畜禽粪便管理系统中甲烷的产排特征及减排对策[J].土壤学报,2012,49(4):815-823.[CHEN Rui-rui,WANG Yi-ming,HU Jun-li,*et al.*Methane Emission and Mitigation Strategies in Animal Manure Management System[J].Acta Pedologica Sinica,2012,49(4):815-823.]
- [14] 孙亚男,刘继军,马宗虎.规模化奶牛场温室气体排放量评估[J].农业工程学报,2010,26(6):296-301.[SUN Ya-nan,LIU Ji-jun,MA Zong-hu.Evaluation of Greenhouse Gas Emissions From Scale Dairy Farm[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2010,26(6):296-301.]
- [15] 马宗虎,王美芝,丁露雨,等.规模化肉牛育肥场温室气体排放的生命周期评估[J].农业环境科学学报,2010,29(11):2244-2252.[MA Zong-hu,WANG Mei-zhi,DING Lu-yu.*et al.*Emissions of Greenhouse Gases From an Industrial Beef Feedlot Farm as Evaluated by a Life-Cycle Assessment Method[J].Journal of Agro-

- Environment Science, 2010, 29(11): 2244-2252.]
- [16] 马宗虎, 南国良. 规模猪场厌氧-好氧粪污处理系统温室气体减排量评估[J]. 中国沼气, 2008, 26(5): 3-8. [MA Zong-hu, NAN Guo-liang. Evaluation of Greenhouse Gas Emission Reductions From Implementation of Anaerobic-Aerobic Waste Treatment System on Swine Farm[J]. China Biogas, 2008, 26(5): 3-8.]
- [17] 王效琴, 梁东丽, 王旭东, 等. 运用生命周期评价方法评估奶牛养殖系统温室气体排放量[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 179-184. [WANG Xiao-qin, LIANG Dong-li, WANG Xu-dong, et al. Estimation of Greenhouse Gas Emissions From Dairy Farming Systems Based on LCA[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(13): 179-184.]
- [18] ISO 14040, Environmental Management-Life Cycle-Assessment-Principles and Framework[S].
- [19] 陈莎, 杨孝光, 任丽娟, 等. 生命周期评价应用于温室气体排放的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(6): 164-169. [CHEN Sha, YANG Xiao-guang, REN Li-juan, et al. Research and Progress of Application LCA in GHG Emission[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(6): 164-169.]
- [20] FUKUSHIMA Y, CHEN S P. A Decision Support Tool for Modifications in Crop Cultivation Method Based on Life Cycle Assessment; A Case Study on Greenhouse Gas Emission Reduction in Taiwanese Sugarcane Cultivation[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2009, 14(7): 639-655.
- [21] BASSET-MENS C, KELLIHER F M, LEDGARD S, et al. Uncertainty of Global Warming Potential for Milk Production on a New Zealand Farm and Implications for Decision Making[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2009, 14(7): 630-638.
- [22] CASEY J W, HOLDEN N M. Quantification of GHG Emissions From Sucker-Beef Production in Ireland[J]. Agricultural Systems, 2006, 90(1/3): 79-98.
- [23] NGUYEN T L T, HERMANSEN J E, MOGENSEN L. Environmental Consequences of Different Beef Production Systems in the EU[J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(8): 756-766.
- [24] VERGÉ X P C, DYER J A, DESJARDINS R L, et al. Greenhouse Gas Emissions From the Canadian Beef Industry[J]. Agricultural Systems, 2008, 98(2): 126-134.
- [25] 梁龙, 陈源泉, 高旺盛. 基于生命周期的循环农业系统评价[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2795-2803. [LIANG Long, CHEN Yuan-quan, GAO Wang-sheng. Integrated Evaluation of Circular Agriculture System: A Life Cycle Perspective[J]. Environmental Science, 2010, 31(11): 2795-2803.]
- [26] 梁龙, 陈源泉, 高旺盛. 我国农业生命周期评价框架探索及其应用: 以河北栾城冬小麦为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(5): 154-160. [LIANG Long, CHEN Yuan-quan, GAO Wang-sheng. Framework Study and Application of Agricultural Life Cycle Assessment in China: A Case Study of Winter Wheat Production in Luancheng of Hebei[J]. Chian Population, Resources and Environment, 2009, 19(5): 154-160.]
- [27] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编 2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014. [The National Development and Reform Commission, Price Department. The National Agricultural Cost-Benefit Data Assembly, 2014[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014.]
- [28] 段茂盛, 王革花. 畜禽养殖场沼气工程的温室气体减排效益及利用清洁发展机制(CDM)的影响分析[J]. 太阳能学报, 2003, 24(3): 386-389. [DUAN Mao-sheng, WANG Ge-hua. Greenhouse Gas Mitigation Benefits of Biogas Project in Licesstock Farms[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2003, 24(3): 386-389.]
- [29] IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[S]. Hayama, Japan: IGES, 2006.
- [30] 张强, 巨晓棠, 张福锁. 应用修正的 IPCC 2006 方法对中国农田 N₂O 排放量的重新估算[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 7-13. [ZHANG Qiang, JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Re-Estimation of Direct Nitrous Oxide Emission From Agricultural Soils of China via Revised IPCC 2006 Guideline Method[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 7-13.]
- [31] 赵荣芳, 陈新平, 张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 684-697. [ZHAO Rong-fang, CHEN Xin-ping, ZHANG Fu-suo. Nitrogen Cycling and Balance in Winter-Wheat-Summer-Maize Rotation System in the North China Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(4): 684-697.]
- [32] Methane Recovery in Agricultural and Agro Industrial Activities-Version 14 (AMS - III. D), Version 10, 2016. 7. 28 [EB/OL]. [2016-04-16]. http://cdm.unfccc.int/filestorage/C/D/M/CD-MWF_AM_LM875Z64MVHWOE3JVL4BGGIC4SRUBE/AMS_III.D_ver10.pdf?t=RGt8b2lpbTRufDCd2IMivSQCrCznKjnisRdw.
- [33] 冯莽. 我国化肥生产能耗及消费之现状分析[EB/OL]. (2005-04-28) [2016-04-16]. <http://www.ampcn.com/news/detail/9249.asp>. [FENG Mang. Analysis of Energy Consumption and Consumption of Fertilizer Production in China[EB/OL]. (2005-04-28) [2016-04-16]. <http://www.ampcn.com/news/detail/9249.asp>.]
- [34] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 2015 年中国区域电网基准线排放因子[EB/OL]. [2016-04-16]. <http://wenku.baidu.com/link?url=idbSvNzz2fLSl1WXiEmtLL1amhQTHmtqqQ6g1cp-oU1X3W4wF2Wdu5LSe745rwjCkYGCgdV0pXJm2gQ19IMK-nRKn-kq0w50OCiDCQjfkki&qq-pf-to=pcqq.c2c>. [National Development and Reform Commission to Deal With Climate Change Division. Baseline emission factors of China's Regional Power Grid in 2015 [EB/OL]. [2016-04-16]. <http://wenku.baidu.com/link?url=idbSvNzz2fLSl1WXiEmtLL1amhQTHmtqqQ6g1cp-oU1X3W4wF2Wdu5LSe745rwjCkYGCgdV0pXJm2gQ19IMK-nRKn-kq0w50OCiDCQjfkki&qq-pf-to=pcqq.c2c>.]
- [35] BASSET-MENS C, VAN DER WERF H M G. Scenario-Based Environmental Assessment of Farming System: The Case of Pig Production in France[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 105(1/2): 127-144.
- [36] BLONK H, LAFLEUR M C C, VAN ZEIJTS H. Towards an Environmental Infrastructure of the Dutch Food Industry: Exploring the Information Conversion of Five Food Commodities[M]. Amsterdam, Holland: IVAM Environmental Research, 1997: 28.
- [37] 周军. 生猪养殖规模与主产地移动、温室气体排放研究: 基于

- 江苏省调查数据[D].南京:南京农业大学,2012.[ZHOU Jun. Study on Pig Breeding Scale and Origin Mobile, Greenhouse Gas Emissions-Based on the Survey Data of Jiangsu Province[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.]
- [38] VRIES M D, BOER I J M D. Comparing Environment Impacts for Livestock Products: A Review of Life Cycle Assessments[J]. *Livestock Science*, 2010, 128(1): 1-11.
- [39] WANG X Q, KRISTENSEN T, MOGENSEN L, *et al.* Greenhouse Gas Emissions and Land Use From Confinement Dairy Farms in the Guanzhong Plain of China: Using a Life Cycle Assessment Approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 113(2): 577-586.
- [40] GERBER P J, STEINFELD H, HENDERSON B, *et al.* Tackling Climate Change Through Livestock: A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities[R]. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013.
- [41] 吉艳芝, 冯万忠, 郝晓然, 等. 不同施肥模式对华北平原小麦-玉米轮作体系产量及土壤硝态氮的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(11): 1725-1731. [JI Yan-zhi, FENG Wan-zhong, HAO Xiao-ran, *et al.* Effects of Different Fertilization Pattern on the Yield of the Rotation System of Wheat and Maize and Soil Nitrate Accumulation in North China Plain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(11): 1725-1731.]
- [42] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地施有机肥对土壤水分和玉米经济效益影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 144-149. [WANG Xiao-juan, JIA Zhi-kuan, LIANG Lian-you, *et al.* Effects of Organic Fertilizer Application on Soil Moisture and Economic Returns of Maize in Dryland Farming[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6): 144-149.]
- [43] 马永喜, 王颖. 规模化畜牧养殖废弃物处理的环境经济优化研究: 基于生态经济模型的分析[J]. *农业现代化研究*, 2014, 35(3): 340-344. [MA Yong-xi, WANG Ying. Optimization of Environmental and Economic Effects in Waste Treatment of Intensive Livestock Production: An Analysis Based on "Ecological Economic" Model[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2014, 35(3): 340-344.]
- [44] CHINH N Q. Dairy Cattle Development: Environmental Consequences and Pollution Control Options in Hanoi Province, North Vietnam[R]. Singapore: The Economy and Environment Program for Southeast Asia (EEPSEA), 2005: 6.
- [45] 马荣华, 丁一凡, 南国良, 等. 基于CDM的规模猪场大型沼气工程经济评价[J]. *中国畜牧杂志*, 2008, 44(17): 50-52. [MA Rong-hua, DING Yi-fan, NAN Guo-liang, *et al.* Economic Evaluation of Large Scale Biogas Project Based on the CDM[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2008, 44(7): 50-52.]
- [46] VANOTTI M B, SZOGI A A, VIVES C A. Greenhouse Gas Emission Reduction and Environmental Quality Improvement From Implementation of Aerobic Waste Treatment Systems in Swine Farms[J]. *Waste Management*, 2008, 28(4): 759-766.
- [47] 李玉娥, 董红敏, 万运帆, 等. 规模化养鸡场CDM项目减排及经济效益估算[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(1): 194-198. [LI Yu-e, DONG Hong-min, WAN Yun-fan, *et al.* Emission Reduction From Clean Development Mechanism Projects on Intensive Livestock Farms and Its Economic Benefits[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(1): 194-198.]
- [48] 罗一鸣, 李国学, SCHUCHARDT F, 等. 过磷酸钙添加剂对猪粪堆肥温室气体和氨气减排的作用[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 235-242. [LUO Yi-ming, LI Guo-xue, SCHUCHARDT F, *et al.* Effects of Additive Superphosphate on NH_3 , N_2O and CH_4 Emissions During Pig Manure Composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(22): 235-242.]
- [49] 陶金沙, 李正东, 刘福理, 等. 添加小麦秸秆生物质炭对猪粪堆肥腐熟程度及温室气体排放的影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(5): 1233-1240. [TAO Jin-sha, LI Zheng-dong, LIU Fu-li, *et al.* Effects of Wheat Straw Biochar on Maturity Extent and Greenhouse Gases Emissions During Swine Manure Composting[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(5): 1233-1240.]

作者简介: 石鹏飞(1989—),男,陕西榆林人,硕士生,主要研究方向为集约持续农作制度。E-mail: spf1023@sina.com

(责任编辑: 许素)